

# 考虑颗粒形状的粗粒土渗透特性试验研究

邱珍锋<sup>1,2</sup>, 卢孝志<sup>1,2</sup>, 伍应华<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;  
2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 粗粒土的渗透特性与物质成分、颗粒级配、颗粒形状、密实度等因素相关。通过室内垂直渗透试验, 探讨了土体颗粒形状、颗粒级配和试样密实度对粗粒土渗透系数的影响。九组正交试验结果的极差及方差分析表明, 级配对渗透性的影响最大; 两组颗粒形状对比分析试验结果表明, 试样渗透系数随着颗粒球形度增大而增大。通过对试验结果反映的渗透特性进行分析, 总结了以渗透系数作为变量的临界水力梯度估算公式。

**关键词:** 粗粒土; 渗透系数; 颗粒级配; 干密度; 颗粒形状

中图分类号: TU411.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2014)04-0102-05

## Experimental Research on the Permeability Property of Coarse Grained Soils Considering the Particle Shape

QIU Zhen feng<sup>1,2</sup>, LU Xiao zhi<sup>1,2</sup>, WU Ying hua<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The permeability property of coarse grained soils is closely related to material composition, grain size distribution, particle shape, and particle density. Based on the laboratory permeability test, the effects of particle shape, grain size distribution, and particle density on the permeability property of coarse grained soils were studied. Nine orthogonal experiments and two particle shape experiments were performed. The results showed that grain size distribution has the largest impact on permeability based on the range analysis and variance analysis of the orthogonal tests, and permeability increases with the increasing of particle sphericity based on the comparative analysis of two particle shape tests. The estimation formula of critical hydraulic gradient was proposed using the permeability coefficient as a variable based on the analysis of permeability characteristics reflected by the above tests.

**Key words:** coarse grained soils; permeability coefficient; grain size distribution; dry density; particle shape

土体材料是典型的孔隙介质, 其渗透特性与形成孔隙结构的颗粒大小、形状、级配组成等因素密切相关<sup>[1]</sup>。目前, 关于颗粒级配、干密度、砾石和细颗粒含量等因素对渗透特性影响的研究成果较多<sup>[2-6]</sup>, 而颗粒形状的影响往往被忽略, 例如周中等<sup>[7-8]</sup>对粗颗粒土进行了砾石含量、孔隙比、颗粒形状三种因素的渗透特性正交试验, 认为砾石含量对渗透性的贡献比孔隙比、颗粒形状要大。虽然颗粒形状量化指标繁多, 但多数学者认为采用磨圆度和球形度进行分析比较合适<sup>[9-10]</sup>。另外, 颗粒表面粗糙程度也对宏观力学有一定的影响, 刘清秉等曾<sup>[11-12]</sup>采用球形度、磨圆度、粗糙度分析了颗粒形状对土体材料剪切强度和桩端阻力等力学指标的影响。

为了分析颗粒形状对渗透特性的影响, 本文结合颗粒形状量化分析方法, 采用常水头渗透试验, 对卵石、卵石破碎料、泥岩颗粒料三种粗颗粒材料的级配、干密度、颗粒形状的正交设计进行了垂直渗透试验, 并分析了渗透系数与临界水力梯度之间的关系。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验土料

试验土料取3种: 泥岩颗粒、卵石颗粒及卵石颗粒破碎料见图1。泥岩取自重庆三叠系上统须家河组地层, 弱风化, 紫红色, 泥岩颗粒料棱角分明; 卵石取自枯水期的河滩中, 呈

收稿日期: 2013-10-30 修回日期: 2014-02-10 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAB05B04); 重庆交通大学研究生教育创新基金资助项目(2011(上)第06号)

作者简介: 邱珍锋(1988-), 男, 江西信丰人, 博士研究生, 主要从事水利工程方面的研究。E-mail: qiu\_zhenfeng3012@163.com

球状、椭球状;将卵石破碎之后的颗粒作为卵石破碎颗粒料,其形状特性介于卵石与棱角分明的泥岩颗粒料。

试验时,对3种粗粒料分别拟定一种颗粒级配见图2。各级配均属级配良好的土体级配,不均匀系数和曲率系数均满足  $Cu \geq 5, 1 < Cc < 3$  的要求。

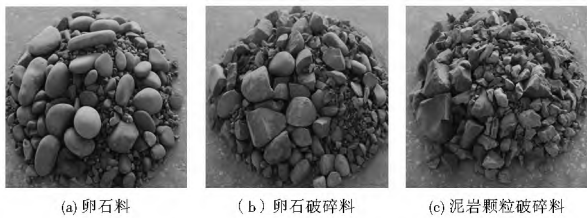


图1 试验土料

Fig. 1 Test soil samples

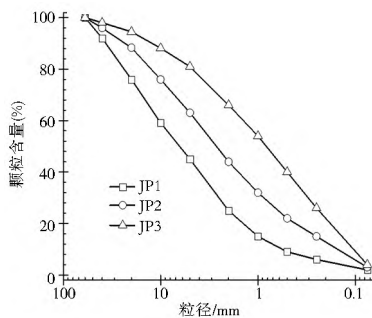


图2 试验土料级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of test soil samples

## 1.2 试验方案

孔隙介质的渗透特性与颗粒的级配、形状及其间的孔隙结构分布和组成成分等密切相关<sup>[7-8]</sup>。本试验只分析颗粒形状、干密度及级配三种因素对渗透特性的影响,拟定干密度为  $1.90 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.95 \text{ g/cm}^3$ 、 $2.00 \text{ g/cm}^3$  三种水平见表1。正交试验方案设计见表2,另设计2组颗粒形状对比分析试验。

表1 影响因素设计

Table 1 Factors and levels

水平	因素		
	形状	级配	干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
1	卵石	JP1	1.90
2	破碎卵石	JP2	1.95
3	泥岩	JP3	2.00

## 2 试验方法

### 2.1 仪器介绍

试验仪器采用自制的常水头渗透仪<sup>[13]</sup>见图3。为了便于击实,仪器设计为长方体,试样尺寸为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。试验用水是水温高于室温  $3 \text{ }^\circ\text{C} \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$  的脱气水;饱和控制水头差不大于  $2 \text{ cm}$ ,即常水头条件,保证试样结构不会在饱和过程遭受破坏。仪器采用“O”型密封圈、橡胶垫以及螺栓止水,上盖、下盖及前盖可拆卸,并采用测压管和孔压传感器实时监测土样中的孔隙压力,通过数据采集系统记录和保存数据。试验过程中采用常水头和氮气加压的两种方式控制水头,并配备高精度加压控制阀,前部分采用不同高度放置大水桶控制常水头,且保证水桶内水面保持不变。

表2 正交试验方案

Table 2 Test scheme of orthogonal tests

实验编号	因素			备注
	形状	级配	干密度	
A1	1	1	1	
A2	1	2	2	
A3	1	3	3	
A4	2	1	2	
A5	2	2	3	正交试验
A6	2	3	1	
A7	3	1	3	
A8	3	2	1	
A9	3	3	2	
B10	1	2	1	形状对比试验
B11	2	2	1	



图3 试验仪器

Fig. 3 Test instruments

### 2.2 试验步骤

(1) 制样。按拟定试验方案中的级配及干密度进行取样,制样含水率控制为  $8\%$ ,搅拌均匀并闷料  $12 \text{ h}$  以上。将准备好的土料分成三等份,逐层填入竖立放置的仪器中,击实至预定高度并刨毛。

(2) 试样饱和。制样完成后,拧紧螺栓,采用常水头法进行饱和,保证水头差不大于  $2 \text{ cm}$ ,直至出水管处有水连续流出。

(3) 测试。分级加压测试,并同时同时进行人工读取测压管数据和计算机采集孔压数据,直至试样破坏。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验结果

试验结束后,需对试验结果进行温度修正,最终得到标准温度( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )下的渗透系数  $k_{20}$ ,见表3。

### 3.2 正交试验结果分析

对正交试验结果进行极差分析见表4和方差分析见表5。极差越大代表该因素对整体结果的贡献越大<sup>[7]</sup>,由表4可知,级配对粗颗粒土料的渗透系数的影响最大,颗粒的形状及干密度对渗透系数的影响相对较小,且两者的贡献区别并不明显。 $75\%$ 和 $50\%$ 保证率的  $F$  分布临界值分别为  $3.0$ 和 $1.0$ ,从方差分析看出颗粒形状试验的的保证率未达到 $50\%$ ,结果并不理想,可能存在试验误差,试验误差产生的原因较多,其中,试验中饱和过程的控制可能是产生误差的主要原因。如果试样中的孔隙气泡未全面排除,造成空隙堵塞,

表 3 试验结果  
Table 3 Test results

试验编号	$k_T / (10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	温度 $T / ^\circ\text{C}$	温度修正系数 $\eta_t / \eta_{20}$	$k_{20} / (10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	临界坡降 $i_{cr}$
A1	0.770	10.6	1.275	0.982	1.040
A2	23.650	9.7	1.308	30.929	0.204
A3	3.770	11.2	1.254	4.727	0.315
A4	62.000	10.0	1.297	80.414	0.094
A5	3.740	12.1	1.224	4.577	0.396
A6	1.840	12.0	1.227	2.258	0.579
A7	9.110	10.0	1.297	11.816	0.102
A8	0.870	9.8	1.304	1.135	1.225
A9	0.160	9.8	1.304	0.209	1.923
B10	8.740	11.2	1.254	10.958	0.113
B11	6.390	12.1	1.224	7.820	0.227

渗透通道不畅, 试验结果受到显著的影响, 正因如此, 为了分析颗粒形状对渗透特性的影响, 另加了两组对比分析试验 B10、B11。其余两组水平试验结果保证率基本符合要求, 具

有一定的代表性, 级配试验结果可以看出, 误差基本是由于水平差异引起的, 因而, 认为级配对渗透性的影响最大是可信的。

表 4 极差分析表  
Table 4 Range analysis

实验编号	因素				渗透系数 $k_{20} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	目标	极值				
	形状	级配	干密度	空列			形状	级配	干密度	空列	
A1	1	1	1	1	0.982	$K_{j1}$	36.64	93.21	4.37	5.77	
A2	1	2	2	2	30.929	$K_{j2}$	87.25	36.64	111.55	45.00	
A3	1	3	3	3	4.727	$K_{j3}$	13.16	7.19	21.12	86.28	
A4	2	1	2	3	80.414	$\bar{K}_{j1}$	12.21	31.07	1.46	1.92	$K = 137.05$
A5	2	2	3	1	4.577	$\bar{K}_{j2}$	29.08	12.21	37.18	15.00	$P = 2\ 086.85$
A6	2	3	1	2	2.258	$\bar{K}_{j3}$	4.39	2.40	7.04	28.76	$Q = 7\ 613.34$
A7	3	1	3	2	11.816	$Q_j$	3\ 042.62	3\ 360.91	4\ 303.02	3\ 167.33	
A8	3	2	1	3	1.135	$S_j^2$	955.77	1\ 274.07	2\ 216.17	1\ 080.48	
A9	3	3	2	1	0.209	极差	7.83	28.67	5.58	26.84	$ST^2 = 5\ 526.49$

(附:  $K_{j1}$  表示  $j$  列水平 1 试验值之和,  $K_{ji}$  表示对应  $K_{j1}$  的均值,  $S_j^2$  表示  $j$  列离差平方和,  $ST^2$  总离差平方和)

表 5 方差分析表  
Table 5 Variance analysis

方差来源	离差平方和	自由度	均方差	$F$ 值	$F$ 临界值
形状	955.77	2	477.89	0.88	
级配	1\ 274.07	2	637.03	1.18	$F_{0.25}(2, 2) = 3$
干密度	2\ 216.17	2	1\ 108.09	2.05	$F_{0.5}(2, 2) = 1$
误差	1\ 080.48	2	540.24		
总和	5\ 526.49	8			

### 3.3 颗粒形状试验

颗粒形状的描述方法比较多, 且学者们意见尚不统一<sup>[1]</sup>。范淑果等<sup>[9]</sup>从机械零件的角度出发, 分析了圆度误差中的几种描述方式的差异, 认为最小外接圆法对评定零件的形状是比较合适的; 卓兴仁等<sup>[10]</sup>认为这几种方式应采用统计的方法确定最终的结果, 刘清秉等<sup>[11-12]</sup>计算了 100 个颗粒样本的球形度, 将均值和统计期望作为该样本的球形度, 以此来分析颗粒形状与力学强度指标等的关系, 得到较为理想的效果。为此, 笔者通过对每组粒径颗粒取 50 个试样颗粒进行拍照, 经图片处理, 得出颗粒最大内切圆直径  $d_1$  及最小外接圆直径  $d_2$ , 球形度定义为  $\xi = d_1 / d_2$  的值, 将每组粒径的

均值按级配中的颗粒百分含量分配再加权, 最终确定该种颗粒的球形度。根据球形度的定义, 标准圆的球形度  $\xi$  为 1, 颗粒的球形度均  $\xi \leq 1$ ; 棱角越分明、越不规则的颗粒球形度越小。试验中的几种颗粒球形度结果见表 6。

表 6 颗粒形状量化  
Table 6 Quantification of particle shape

形状	球形度	$k_{20} / (10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	临界坡降 $i_{cr}$
卵石	0.678	10.958	0.113
卵石破碎	0.606	7.820	0.227
泥岩	0.574	1.135	1.225

表 3 中的对比试验 B10、B11、A8 分别代表了颗粒级配为 JP2、干密度为  $1.90 \text{ g/cm}^3$  的卵石、卵石破碎料、泥岩颗粒料的试验, 渗透系数结果分别为  $10.958 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 、 $7.820 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 、 $0.299 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 。从表 6 中可以看出, 从卵石、卵石破碎到泥岩, 球形度逐渐减小, 渗透系数呈减小的趋势; 临界坡降随着球形度的减小而增大。分析认为, 涉水颗粒表面形成一层水膜, 水膜的吸附作用比较大, 以致渗流孔隙相对减小。卵石比较圆润, 泥岩棱角分明, 相同体积下泥岩比卵石的比表面积大, 导致泥岩颗粒料渗流通道小, 渗透系数小;

临界坡降是指大量颗粒跳动时的水力坡降, 圆润的卵石颗粒之间的接触较小, 粗糙程度小<sup>[11]</sup>, 对移动颗粒的阻碍小, 使得临界坡降值也小; 从孔隙直径的角度上, 卵石颗粒料由于比表面积小形成孔隙大, 渗透阻力小, 导致其临界坡降较小。

孔隙介质的渗透特性与孔隙系统大小、排列、接触方式等关系密切, 颗粒级配只是宏观上描述颗粒介质的某些统计特征<sup>[1]</sup>。细观层面上, 颗粒的形状、粗糙度及之间的接触等使得颗粒材料的力学机理更加复杂。笔者采用球形度的概念仅从卵石、卵石破碎料、泥岩颗粒料三者之间的颗粒形状对渗透特性的影响进行分析, 得出球形度越大的颗粒渗透系数越大的规律, 与周中等<sup>[7-8]</sup>的研究成果一致; 通过正交试验的分析, 发现颗粒级配对渗透系数的影响比干密度和颗粒形状大, 干密度与颗粒形状对渗透系数的影响相差不大, 而邱贤德等<sup>[14-15]</sup>在堆石体渗透特性的研究中也得出相应结论。

### 3.4 渗透特性分析

孔隙介质的渗透系数、临界坡降都与材料本身属性有关, 其中渗透系数的测试简单, 而填土工程材料的临界水力梯度难于测定, 但其对许多渗流问题分析更有意义。因此笔者尝试建立以渗透系数来描述坡降的公式, 并与朱崇辉<sup>[3]</sup>、刘黎<sup>[2]</sup>的试验成果进行对比分析见图4。

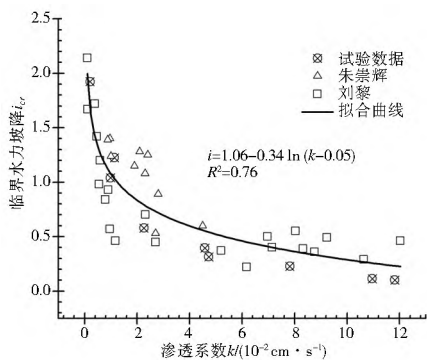


图4 渗透特性

Fig. 4 Permeability property

从图4中可以得出渗透系数k与临界水力梯度*i<sub>cr</sub>*之间的对数关系, *R*<sup>2</sup>为0.76, 拟合公式为:

$$i_{cr} = 1.06 - 0.34 \ln(k - 0.05) \quad (1)$$

从公式(1)和图4可以看出, 临界水力梯度随着渗透系数的增大而非线性递减, 渗透系数k从0.11 × 10<sup>2</sup> cm/s增大到4.45 × 10<sup>2</sup> cm/s的过程中, 临界水力梯度递减较快; 随后随着渗透系数的增大而呈现缓慢递减过程。

周中等<sup>[7-8]</sup>建立了颗粒组成特征与渗透系数之间的关系, 认为渗透系数与级配等效粒径、曲率系数等成正比关系; 邱贤德等<sup>[14-15]</sup>提出了渗透系数、临界水力梯度与粗颗粒含量之间的关系, 认为渗透系数与粗颗粒含量呈负指数关系, 临界水力梯度与其呈指数关系, 这些结论的前提是渗透系数、临界坡降等是材料的本质属性, 是相互联系的。因而, 笔者从试验结果和前人研究成果中总结了渗透系数与临界水力梯度之间的关系式, 但该公式的分析介于渗透系数在0.1~0.13 cm/s范围, 因此, 具有一定的缺陷性。

## 4 结论

通过试验研究, 分析了渗透特性与颗粒级配、形状及干

密度的关系, 得出以下结论。

(1) 粗粒土的渗透系数与土体颗粒级配、颗粒形状和干密度等密切相关, 其中, 颗粒级配对渗透系数的影响最大; 渗透系数随着颗粒球形度的增大而增大;

(2) 渗透系数在一定范围内与临界水力梯度之间的非线性相关性明显, 可用渗透系数估计临界水力梯度大小。由于本试验成本大, 得到的样本不多, 因此更深入的研究还需要增加实验样本。

### 参考文献(References):

- [1] 张家发, 焦超超. 颗粒形状对多孔介质孔隙特征和渗流规律影响研究的探讨[J]. 长江科学院院报. 2011, 28(3): 39-44. (ZHANG Jia fa, JIAO Jiu jiu. Influence of Grain Shape on Characteristics of Pores and Seepage in Porous Media[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. 2011, 28(3): 39-44. (in Chinese))
- [2] 刘黎. 粗粒料渗透特性及渗透规律试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (LIU Li. Testing Study on Seepage Property and Seepage Law of the Coarse Grain[D]. Chendu: Sichuan University, 2006. (in Chinese))
- [3] 朱崇辉. 粗粒土的渗透特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006. (ZHU Chong hui. Study on the Coarse grained Soil Permeability Characteristic[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University. 2006. (in Chinese))
- [4] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(09): 1385-1388. (HU ANG Xiarr wu, TANG Ping, MIAO Xie xing, et al. Testing Study on Seepage Properties of Broken Sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(09): 1385-1388. (in Chinese))
- [5] 马占国, 缪协兴, 李兴华, 等. 破碎页岩渗透特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(03): 260-264. (MA Zharr guo, MIAO Xie xing, LI Xing hua, et al. Permeability of Broken Shale[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(03): 260-264. (in Chinese))
- [6] 唐军峰, 徐国元, 唐雪梅, 等. 坝基破碎带岩体渗透特性试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2010, 25(02): 40-44. (TANG Jun feng, XU Guo yuan, TANG Xue mei, et al. Experimental Study of Seepage Character of Fractured Belt in Concrete Gravity Dam Foundation[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 25(02): 40-44. (in Chinese))
- [7] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1134-1138. (ZHOU Zhong, FU He lin, LIU Bao chen, et al. Orthogonal Tests on Permeability of Soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134-1138. (in Chinese))
- [8] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(6): 25-28. (ZHOU Zhong, FU He lin, LIU Bao chen, et al. Experiment Study of the Permeability of Soil-rock mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences). 2006, 33(6): 25-28. (in Chinese))
- [9] 范淑果, 郝宏伟, 杜皓. 选择圆度误差评定方法的体会[J]. 计量与测试技术, 2009(10): 28-30. (FAN Shu guo, HAO Hong wei, DU Hao. Impressions on Choosing Evaluating Method of

- Roundness Error[J]. Measurement and Testing, 2009(10): 28-30. (in Chinese)
- [10] 卓兴仁, 刘焕文, 王永波, 等. 圆度误差4种评定方法评定结果关系的研究[J]. 北京工业大学学报, 1996, 22(2): 111-114. (ZHOU Xing-ren, LIU Huan-wen, WANG Yong-bo, et al. The Relationship of the Different Verifying Results of Circularity Deviation Through Four Different Ways[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1996, 22(2): 111-114. (in Chinese))
- [11] 刘清秉, 项伟, M. Budhu, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400-410. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, M. Budhu, et al. Experimental Study of Effect of Particle Shapes on Shear Strength of Sand and Tip Resistance of Driven Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 400-410. (in Chinese))
- [12] 刘清秉, 伟项, B. M. Lehane, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(21): 190-197. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, B. M. Lehane, et al. Study of Particle Shape Quantification and Effect on Mechanical Property of Sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(21): 190-197. (in Chinese))
- [13] 邱珍锋. 砂泥岩混合料各向异性渗透特性试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. (QIU Zhen-feng. Experimental Study on Anisotropic Permeability Characteristics of Sandstone-mudstone Particle Mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [14] 邱贤德, 阎宗岭, 刘立, 等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950-954. (QIU Xiande, YAN Zongling, LIU Li, et al. Effect of Particle size Characteristic on the Seepage Property of Rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 950-954. (in Chinese))
- [15] 邱贤德, 阎宗岭, 姚本军, 等. 堆石体渗透特性的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(2): 6-9. (QIU Xiande, YAN Zongling, YAO Benjun, et al. Effect of Particle size Characteristic on the Seepage Property of Rockfill[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003, 35(2): 6-9. (in Chinese))

(上接第71页)

#### 参考文献(References):

- [1] 漯河市澧河改道提前入沙河工程可行性研究报告[R]. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 2013. (Feasibility Research Report of Diverted the Flood of Lihe River into Shahe River in Advance Project in LuoHe[R]. Survey, Design & Research Co., LTD of Water Conservancy of Henan, 2010. (in Chinese))
- [2] 漯河市澧河改道提前入沙河工程模型试验研究[R]. 天津大学水力学所, 河南省水利勘测设计研究有限公司, 2013. (Model Testing Study on Diverted the flood of Lihe River into Shahe River in advance Project in LuoHe[R]. Hydraulics Institute of Tianjin University, Survey, Design & Research Co., LTD of Water Conservancy of Henan, 2010. (in Chinese))
- [3] 刘伟, 和宛琳, 刘晓琴. 漯河市沙北地区防洪工程方案研究[J]. 河南水利与南水北调, 2012, (17): 32-33. (LIU Wei, HE Wanlin, LIU Xiaolin. Flood Control Scheme Research of Area North of ShaHe of the City of Luohe, Henan Water Resources & South to North Water Diversion, 2012, (17): 32-33. (in Chinese))
- [4] 季益柱, 丁全林, 王玲玲, 等. 三峡水库一维水动力数值模拟及可视化研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(11): 21-24. (JI Yizhu, DING Quanlin, WANG Lingling, et al. 1-D Hydrodynamic Numerical Simulation of Three Gorges Reservoir and its Visualization Study[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(11): 21-24. (in Chinese))
- [5] J M Dias, M C Sousa, X Bertin et al. Numerical Modeling of the Impact of the Ancao Inlet Relocation (Ria Formosa, Portugal)[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(6): 711-725.
- [6] 王延贵, 胡春宏, 朱毕生. 模型沙起动流速公式的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 518-523. (WANG Yangui, HU Chunhong, ZHU Bisheng. Study on Formula of Incipient Velocity of Sediment in Model Test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 518-523. (in Chinese))
- [7] 王玉海, 蒋卫国, 王艳红. 冲刷物理模型试验的比尺效应研究[J]. 泥沙研究, 2012, (03): 31-34. (WANG Yuhai, JIANG Weiguo, WANG Yanhong. Study of Scale Effect in Scour Physical model Experiments. Journal of Sediment Research, 2012, (03): 31-34. (in Chinese))
- [8] 水工(常规)模型试验规程SL 155-2012[R]. 中华人民共和国水利部. (Test Regulation for Normal Hydraulic Model, SL 155-2012[R]. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China)
- [9] 河工模型试验规程SL 99-2012[R]. 中华人民共和国水利部. (Test Regulation for Model River, SL 99-2012[R]. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China)
- [10] 河流泥沙颗粒分析规程SL42-2010[R]. 中华人民共和国水利部. (Technical Standard for Determination of Sediment Particle Size in open Channels, SL42-2010[R]. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China)